

В диссертационный совет ПДС 0200.007

при Федеральном государственном

автономном образовательном

учреждении высшего образования

«Российский университет дружбы народов»

адрес: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**На диссертацию Морозова Виталия Михайловича
“Нелинейные модели радиационно-стимулированной диффузии точечных дефектов
и роста когерентных структур в кристаллических средах”,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика**

Представленная на отзыв диссертация Морозова В. М. является теоретическим исследованием процессов возникновения в твердых телах когерентных и периодических структур под действием внешнего излучения. Излучение чаще всего приводит к деградации материалов вследствие появления множества различных дефектов в кристаллической структуре. Но в определенных условиях дефекты под действием внутренних процессов объединяются в регулярные структуры – сверхрешетки, что приводит к существенным изменениям свойств материалов.

Актуальность темы. На сегодняшний день актуальной и нерешенной задачей является выяснение механизмов и критериев появления регулярных структур под действием излучения, а также основных их параметров. К настоящему времени имеется целый ряд различного рода моделей, но общего понимания процессов формирования сверхрешеток пока не достигнуто. В этой связи диссертационная работа Морозова В.М. представляет несомненный интерес. В ней предложен и исследован ряд новых моделей и подходов к их конструированию, связанных с процессами изменения свойств материалов под воздействием излучения. В основу этого подхода положены методы теоретической и математической физики из области нелинейной динамики точечных дефектов в средах с диффузионным переносом и источниками, связанными с внешним излучением. Можно констатировать, что диссертационная работа Морозова В.М. является актуальным теоретическим исследованием, содержащим новые результаты в области радиационного воздействия излучения на вещество.

Структура и содержание работы. Диссертация Морозова В.М. состоит из 5 глав, Введения и Заключения. Содержит список литературы из 266 ссылок на работы в российской и зарубежной печати. Кроме этого, диссертация содержит Приложение из четырех разделов. Содержание диссертации иллюстрируется 20 рисунками с подписями и 5 таблицами.

Введение диссертационной работы содержит обоснование актуальности решаемых задач, общие сведения о диссертационной работе, указана новизна результатов и перечислены основные выносимые на защиту положения. Имеется список сокращений, используемых в тексте диссертации.

Первая глава содержит литературный обзор работ как экспериментального, так и теоретического характера, позволяющий оценить степень новизны проводимых в диссертации исследований и сформулировать постановку решаемых в диссертации задач.

Вторая глава диссертации связана с применением в теории линейных диффузионных процессов в средах с распределенными источниками методов теории квазилинейных уравнений первого порядка. Такие модели более привычны в задачах гидродинамики или при описании волновых процессов. Поэтому использованный в данной главе метод интересен тем, что позволяет описать появление в диффузионной среде волн с опрокидывающимися фронтами. Сам использованный здесь метод и полученные с его помощью результаты обладают новизной и интересны с точки зрения общей теории диффузионных процессов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию диффузионных процессов в средах, в которых и коэффициент диффузии, и источники дефектов являются нелинейными функциями концентрации этих дефектов. Основное внимание в этой главе уделено одномерным нелинейным диффузионным уравнениям. Для исследования этих уравнений в главе используется метод функциональных подстановок, позволяющий получать точные решения исследуемых уравнений. Глава содержит описание нескольких оригинальных вариантов метода функциональных подстановок и набор новых результатов, полученных с его помощью. С точки зрения исходной постановки задачи в диссертации интересен результат, касающийся появления пространственно-периодических структур в случае нелинейного коэффициента диффузии и постоянного по пространству источника, который имитирует внешний источник излучения. Оригинальным представляется также перенос метода функциональных подстановок на модели кластерной динамики. Такие модели используются для описания изменений в структурном и химическом составе материала под действием однородного по пространству воздействия. Среди наиболее важных результатов этой главы следует указать на создание методов анализа нелинейных диффузионных процессов (метод функциональных подстановок) и демонстрацию существования режимов внешнего воздействия на нелинейную среду, сопровождающихся формированием периодических волнообразных структур, отражающих наблюдаемые в реальности когерентные явления.

Глава 4 диссертации посвящена другому новому подходу к исследованию нелинейных диффузионных процессов. Если в предыдущих главах автор уделял основное внимание исследованиям, опирающимся на построения точных решений уравнений диффузии, как линейных, так и нелинейных, то в данной главе основным инструментом исследований является один из вариантов приближения решений рядами, который в диссертации назван методом “быстрой” релаксации – “медленной” диффузии – БРМД. Этот метод является вариантом широко известного в нелинейной динамике метода многомасштабных разложений. В данной главе метод используется для построения приближенных решений нелинейных диффузионных уравнений общего вида, отвечающих формированию периодических структур в результате быстрых релаксационных процессов возникновения точечных дефектов под действием внешнего излучения, и медленных процессов диффузии, приводящих к возникновению в среде сверхрешеток этих дефектов. Наиболее важным результатом этой главы является полученные в ней критерии роста периодических структур при заданных форме нелинейного коэффициента диффузии и нелинейного источника. Безусловно, задание этой формы является ограничивающим фактором при поиске и построении приближенных решений исходной нелинейной задачи. Существенными параметрами, определяющими возможность формирования указанных структур, является характер среды и интенсивность источника дефектов.

В **Главе 5** общий метод БРМД применяется для построения моделей взаимодействия излучения со средой, которые учитывают обратное влияние среды на распространение излучения в ней. Такие модели уже значительно приближены к реальным процессам, происходящим в материалах при их внешнем облучении. Если в

Главе 4 основное внимание уделялось модели только с одним типом дефектов – вакансиями, то в новых моделях среда характеризуется двумя типами дефектов – и вакансиями, и междоузлиями. Поскольку под действием излучения кристаллическая решетка материала деградирует, то построенная модель демонстрирует возникновение структур на определенном этапе внешнего воздействия, и поэтому желательно указать ограничивающие факторы. Разработанная в данной главе модель БРМД представляется наиболее важным результатом данной диссертации и требует дальнейшего развития с применением к конкретным материалам и условиям их облучения.

Заключение содержит перечисление основных результатов и выводы.

Четыре раздела **Приложения** содержат подробный вывод ряда математических соотношений, которые подтверждают достоверность полученных в диссертации результатов.

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы относительно важности и новизны полученных в ней результатов.

В рамках диссертационной работы построен и проанализирован большой набор уже известных и новых моделей диффузионных процессов, как линейных, так и нелинейных. Методы их анализа, такие, как метод квазилинейных уравнений первого порядка, метод функциональных подстановок в нескольких вариантах, а также методы, приводящие к моделям БРМД, действительно обладают новизной. Некоторые методы, например метод функциональных подстановок, представляется важным новым инструментом в теории диффузионных процессов, который можно использовать для решения более широкого круга задач, чем описано в самой диссертации.

Общий подход к построению моделей возникновения сверхрешеток точечных дефектов в форме моделей БРМД, развитый в диссертационной работе, также является новым и достаточно общим инструментом анализа нелинейных диффузионных процессов. В этой связи можно выделить универсальность общих критериев роста периодических структур в рамках этого подхода, полученных в диссертации.

Наиболее интересным результатом данной работы является создание модели взаимодействия внешнего потока излучения со средой, в результате которого возникают периодические структуры. Эти теоретические модели, относящиеся к моделям БРМД, отражают основные свойства наблюдаемых явлений формирования структур под действием излучения, включая эффекты насыщения и асимптотической деградации материалов.

Замечания

В качестве замечания можно указать на то, что в Главе 4 получены критерии роста периодических структур для формы нелинейности моделей общего вида. Однако в этой главе имеется только одна модель формирования структур, под действием лазерного излучения, в которой приведены конкретные оценки условий роста периодических структур. Желательно провести оценки и сравнение с экспериментами с радиационным излучением, а также оценки для нелинейностей различных типов.

В этой главе в оценках метода многомасштабных разложений: а) использовано некорректное время диффузии точечных дефектов (стр. 21-22) и б) считалось, что длительности воздействия лазерного излучения находятся в диапазоне $10^{-6} - 10^{-3}$ с; между тем в современных исследованиях соответствующий диапазон составляет $10^{-15} - 10^{-9}$ с.

Вызывает сомнение утверждение, что при облучении ультракороткоимпульсным лазерным излучением сверхрешетка формируется за субпикосекундные времена.

Также к недостаткам работы можно отнести недостаточную увязку полученных результатов со свойствами реальных материалов и условиями их облучения. В первой главе диссертации значительное место было уделено описанию экспериментальных результатов по исследованию процессов формирования когерентных структур. Поэтому логично было бы провести более детальный анализ сравнения полученных теоретических

результатов с опубликованными экспериментальными данными. Оценки некоторых характерных параметров структур, которые могут появляться при определенных характеристиках среды, приведены в Главе 5. Но их можно было бы сделать более детальными, хотя диссертационная работа и относится к теоретической физике.

В рассмотренных автором моделях не определена ориентация сверхрешеток.

В тексте диссертации встречаются технические и грамматические погрешности, например:

1. «После того, как вычислено решение для $v(z, t)$, решение для $\phi(z, t)$ (224)...».

2. «...в методе ВКБ [263] и квазиклассическом приближении в задаче квантовой механики [264]».

3. Стр. 89, подпись к рис. 9. «Рис. 9: Асимптотики коэффициента в степени экспоненты (76) и (78) при $|z| \rightarrow \infty$ ($\Omega =, k_0 = k_1 =, k_2 =$)». Не определена величина Ω .

Достоверность и новизна результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе Морозова В.И. математических результатов подтверждается в первую очередь подробными математическими вычислениями, часть из которых приведена в Приложении к диссертации. Достоверность физически значимых выводов подтверждается использованием в работе хорошо проверенных на практике исходных положений теории взаимодействия излучения с веществом, а также известными принципами описания диффузионных процессов в кристаллических материалах.

Все результаты работы опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и докладывались на научных конференциях.

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации Морозова В. М.

Заключение. Диссертационное исследование Морозова Виталия Михайловича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи по кандидатской диссертации, имеющей важное значение для теоретической физики в области воздействия внешнего излучения на структуру твердых тел. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно п. 2.2 раздела II (кандидатская) Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а её автор, Морозов Виталий Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности Теоретическая физика 01.04.02.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук Макин Владимир Сергеевич, (специальность 01.04.05 – «Оптика»), профессор, профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация АЭС», Институт ядерной энергетики (филиал) СПбПУ в г. Сосновый Бор.

06 июня 2024 г.

Макин Владимир Сергеевич

Подпись Макаина Владимира Сергеевича заверяю:
Директор Института ядерной энергетики (филиал)
федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого», г. Сосновый Бор,
ул. Солнечная, д.41, 188540, Ленинградская область,
+7(813)694-57-74, secretar@erc.sbor.net



Фещенко Е.К.